

# **Laserbasierte und elektrochemische Oberflächenvorbehandlung als Schlüsseltechnologien für hochfeste Kunststoff-Metall- Verbindungen im Spritzgussprozess**

*J. Steinberg, K. Lippky, S. Hartwig*

*Technische Universität Braunschweig / Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs)*

*j.steinberg@tu-braunschweig.de*

*F. Stojcevski, J. D. Randall, L. C. Henderson*

*Deakin University / Institute for Frontier Materials (IFM)*

*f.stojcevski@deakin.edu.au*

---

## **Abstract**

Die Anwendung der In-Mold-Assembly (IMA) ermöglicht die Herstellung von Hybridbauteilen aus Aluminiumdruckgussbauteilen und Kunststoffen. Für die direkte Anbindung der Kunststoffkomponente über Adhäsion ist eine Vorbehandlung des Druckgussteils erforderlich. Die Laservorbehandlung ermöglicht hochfeste Kunststoff-Metall-Verbindungen ohne zusätzliche Hilfsfügestoffe. Neben der Anwendung eines Lasers zur Vorbehandlung wird eine elektrochemische Oberflächenmodifikationsmethode vorgestellt, mit der Polyacrylsäure auf die Metalloberfläche aufgepfropft wird. Die Untersuchungen zeigen, dass ohne Vorbehandlung keine Verbindungen hergestellt werden können. Im Vergleich dazu können mit polyacrylsäurebeschichteten Gussfügeteilen Festigkeiten von bis zu  $20,41 \pm 6,08$  MPa erzielt werden. In Kombination mit der Laservorbehandlung können die Festigkeiten auf bis zu  $36,43 \pm 5,73$  MPa gesteigert werden.

---

## **1 Einleitung und Stand der Technik**

Die Kombination von Kunststoffen und Aluminiumdruckgusslegierungen zu Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen ist eine Möglichkeit, maßgeschneiderte Bauteile herzustellen, bei denen die Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffklassen synergetisch genutzt werden [1]. Die Herstellung von hybriden Bauteilen kann dabei in die Fertigungsprozessvarianten Post-Mold-Assembly (PMA) und In-Mold-Assembly (IMA)

unterteilt werden [2]. Bei der PMA werden verschiedene Komponenten separat gefertigt und anschließend gefügt, bspw. mittels des wärmeunterstützten Pressfügens. Bei der IMA werden z. B. Druckgussteile in ein Werkzeug gegeben und innerhalb von diesem die zweite Komponente ur- oder umgeformt und in einem Schritt miteinander gefügt [2–4]. Für die Verbindung der Einzelkomponenten auf stoffschlüssiger Basis wird bei der PMA und IMA der adhäsive Charakter der Kunststoffmatrix genutzt [5–6]. Vergleichbar mit der Vorbehandlung von Aluminiumgussoberflächen für Klebeanwendungen [7] ist jedoch eine Vorbehandlung erforderlich, um eine Verbindungsherstellung zu gewährleisten.

Auf dem Gebiet der Metalloberflächenvorbehandlung für Hybridbauteile wurde für diverse Metalle, z. B. DC-01 [8], 1.4301 [9–10], HC420LA [11], DP500 [12], 22MnB5 [12], EN AW 5052 [13], EN AW 6082 [14–16] oder Ti6Al4V [17], gezeigt, dass durch eine Laservorbehandlung hochfeste Metall-Kunststoff-Verbindungen mittels PMA ohne den Einsatz zusätzlicher Hilfsfügestoffe erreicht werden können. Die IMA unter Verwendung des Spritzgießens hat in der Literatur bisher weniger Beachtung gefunden als die PMA. Als metallische Fügepartner wurden z. B. E335 [18], 1.4301 [19], EN AW 1050A [20], EN AW 6060 [19] und EN AW 6082 T6 [21] verwendet, die jeweils in einem Spritzgießwerkzeug mit Schmelze überspritzt und dadurch sowohl das Kunststoffformteil als auch die Verbindung mit dem metallischen Einleger hergestellt wurde [18–21]. Eine Materialklasse, die insbesondere bei funktionsintegrierten Leichtbauentwicklungen starken Einsatz findet, ist bisher nicht umfangreich untersucht worden (z. B. durch Reduktion von Einzelteilen und Zusammenfassen von Funktionen [22–23]), daher steht im Folgenden die Laseroberflächenvorbehandlung von Aluminiumdruckgussteilen im Fokus der Untersuchungen. Neben der Anwendung der Laservorbehandlung wird eine elektrochemische Oberflächenmodifikationsmethode vorgestellt, mit der Polyacrylsäure auf Metalloberflächen aufgepfropft werden kann. [24] konnte die Methode bereits erfolgreich für die Funktionalisierung von Aluminium- und Stahlproben anwenden, wodurch die Oberfläche kompatibler für eine stoffschlüssige Verbindung mit Polyamid 6 wird und somit eine vielsprechende Vorbehandlungsmethode darstellt. Durch die Kombination mit der Laservorbehandlung werden die Anwendungsmöglichkeiten der Methode erweitert.

## **2 Prüfaufbau und -methoden**

### *2.1 Verwendete Materialien und Prüfkörper*

Zur Probenherstellung werden Aluminiumdruckgussproben der Legierung AlSi10MnMg (Silafont®-36) in 95 mm x 25 mm x 6 mm im Gusszustand verwendet

[25]. Für die PMA werden thermoplastische, glasfaserverstärkte Kunststoffbleche (sog. Organobleche mit ~60 Gew.-% (47 Vol.-% laut [26])) mit Polyamid 6 Matrix aus Tepex® dynalite 102-RG600(4)/47 % (PA 6 GF60) mit einer Schmelztemperatur von 220 °C mit den Maßen 25 mm x 105 mm x 2 mm eingesetzt [26]. Die IMA mittels Spritzgießen nutzt das thermoplastische, mit ~30 Gew.-% glasfaserverstärkte Polyamid 6 (PA 6 GF30) Durethan BKV30H2.0EF 901510 der LANXESS Deutschland GmbH (Köln, Deutschland) mit einer Schmelztemperatur von ~221 °C [27], mit den Probenabmessungen 25 mm x 117 mm x 4 mm gespritzt wird.

## 2.2 Oberflächenvorbereitung mit gepulstem Faserlaser

Die Aluminiumdruckgussproben werden am Institut für Füge- und Schweißtechnik nach einer Wischentfettung mit Isopropanol, mit einem nanosekundengepulsten Faserlaser redENERGY G4 H-Typ von SPI Lasers UK Limited (Southampton, Großbritannien) vorbereitet. Die Wellenlänge beträgt  $1062 \pm 3$  nm mit einer mittleren Leistung von 70 W [28]. Zweimaliges Scannen der Oberfläche mit einer F-Theta Linse SS-II-LD-15 der Firma RAYLASE GmbH (Weßling, Deutschland) erzeugt Linienstrukturen orthogonal zur Hauptkrafteinleitungsrichtung bei der Zugscherprüfung (siehe Abb. 3b). Die Vorgehensweise sowie die Laserparameter sind in Abb. 1 aufgeführt.

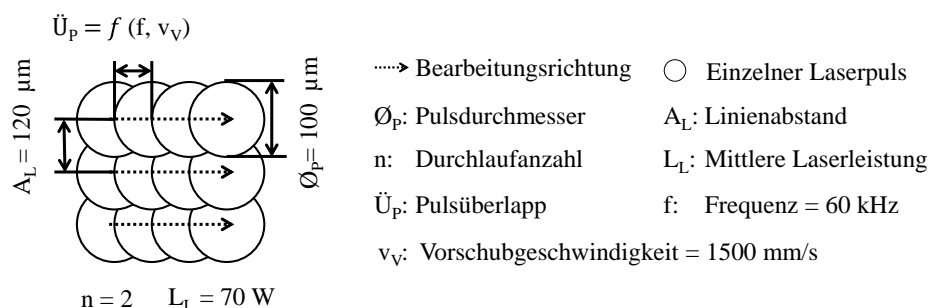


Abb. 1: Laservorbereitungsverfahren der Aluminiumoberfläche und verwendete Parameter

## 2.3 Oberflächenfunktionalisierung durch chemische Modifikation

Die chemische Oberflächenmodifikation wurde am Institute for Frontier Materials mit dem in [24] vorgestellten Aufbau vorgenommen. Dafür werden fünf Aluminiumdruckgussproben in einem Probenhalter positioniert (siehe Abb. 2) und mit leitfähigem Kupferband mit der Arbeitselektrode eines Potentiostaten von Metrohm Autolab B.V. (Utrecht, Niederlande) verbunden. In einem Glasgefäß werden 300 ml Schwefelsäure (0,01 mol/l Konzentration), 20,56 ml Acrylsäure (0,10 mol/l Konzentration) und 142,1 mg Diazoniumsalz gemischt und eine Minute verrührt. Die Gussproben werden

circa 25 mm tief in diese Lösung eingetaucht. Ein Platindrahtgeflecht wird als Gegenelektrode in die Lösung eingetaucht, während eine „Leak-Free“ Ag/AgCl-Elektrode von Warner Instruments, LLC (Holliston, USA) als Bezugselektrode dient. Die NOVA 2.0.1 Software von Metrohm Autolab B.V. wird verwendet, um chronoamperometrisch die Spannung -1 V (gemessen gegen die Ag/AgCl Bezugselektrode) für 1800 s anzulegen. Nach Abschluss der Funktionalisierung werden alle Proben mit Wasser und Aceton gewaschen, bevor sie an der Luft getrocknet werden.

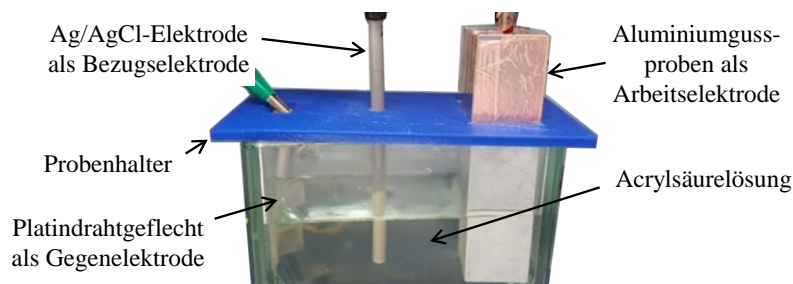


Abb. 2: Laboraufbau zur Funktionalisierung der Gussoberfläche

## 2.4 Probenherstellung

Zur Ermittlung der Verbindungsfestigkeiten werden Zugscherproben in Anlehnung an die DIN EN 1465 gefertigt, die vorgibt, dass die Prüfkörper mit  $12,5 \pm 0,25$  mm Überlapplänge gefügt werden [29].

### 2.4.1 In-Mold-Assembly

Für die IMA wird die Überlapplänge von 12,5 mm auf 5 mm reduziert (s. Abb. 3 b)), um ein Substratversagen der Kunststofffügeteile bei der Prüfung zu vermeiden. Das PA 6 GF 30-Granulat wird vor der Verarbeitung in einem Trockenschrank VD 112 der Firma BINDER GmbH (Tuttlingen, Deutschland) bei 80 °C für mindestens 12 Stunden getrocknet, um eine Blasenbildung beim Spritzgießen auf Grund der Wasseraufnahmefähigkeit des PA 6 zu vermeiden. Die Aluminiumgusseinsleger werden im Werkzeug (siehe Abb. 3 a) mit Heizpatronen und Infrarotstrahlern auf ca. 270 °C erwärmt und mit dem Kunststoffmaterial in einer Spritzgießmaschine victory 330/120 spex der ENGEL AUSTRIA GmbH (Schwertberg, Österreich) überspritzt. Bei Kontakt mit der Schmelze hat die Gussoberfläche noch eine Temperatur von ca. 220 °C [30]. Der Einspritzdruck beträgt 50 MPa, die Einspritzgeschwindigkeit 20 cm<sup>3</sup>/s, die Massetemperatur 275 °C und der Nachdruck 25 MPa. Abbildung 3 zeigt in a) schematisch den Versuchsaufbau und in b) schematisch die gefertigten Zugscherproben.

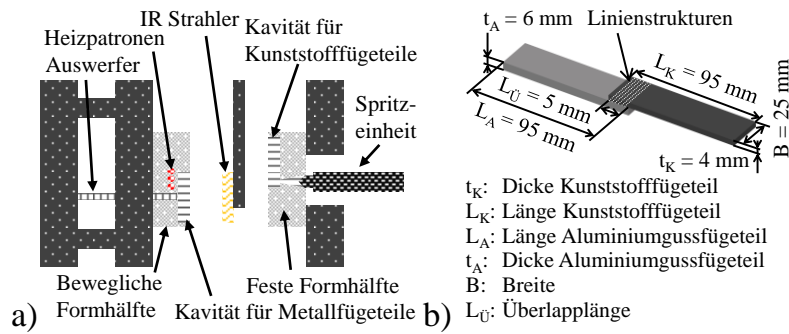


Abb. 3: Schematische Darstellungen: a) Versuchsaufbau der IMA, b) Zugscherproben

#### 2.4.2 Post-Mold-Assembly

Die Gussfügeteile werden mit einer Überlapplänge von 5 mm in einer Heizpresse auf 270 °C erwärmt und auf die Organobleche gepresst, deren Matrix dadurch schmelzflüssig wird und die Guss Oberfläche benetzt. Die Aufrechterhaltung von Druck- und Temperatur während des Fügeprozesses führt dazu, dass das Metall bis zu einer Tiefe von 0,1 mm in das Organoblech eingepresst wird. Durch die abschließende Kühlung erstarrt der Kunststoff und die Verbindung ist hergestellt. Der Fertigungsprozess unterscheidet sich beim ifs und IFM beim Erwärmen, der Druckbeaufschlagung und dem Abkühlprozess. Am ifs werden die Proben mit einem Heizblock ohne zusätzlichen Druck erwärmt (I in Abb. 3a), nach Erreichen der Füge­temperatur mit einer Kühlplatte unter Druck abgekühlt (II in Abb. 3a) und anschließend entnommen (III in Abb. 3b). Am IFM werden die Proben in einer Heizpresse unter Druck erwärmt (I in Abb. 3b) und außerhalb der Presse mit Kühlplatten abgekühlt (III in Abb. 3b), wobei eine kurze Handhabungsphase mit Temperaturverlust und ohne Anpressdruck (II in Abb. 3b) vorliegt.

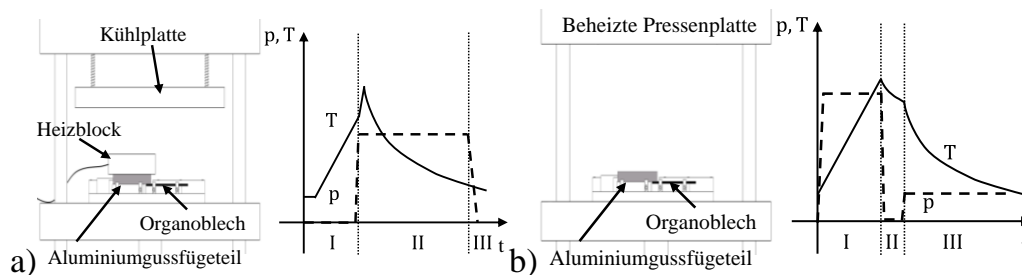


Abb. 4: Schematische Darstellung der PMA am: a) ifs, b) IFM

#### 2.5 Prüfmethoden

Das FEM Quanta FEG 650 Rasterelektronenmikroskop (REM) von Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA) wird zur Charakterisierung der Aluminiumdruckguss Oberfläche verwendet. Der Sekundärelektronendetektor ist ein Everhart-Thornley-Detektor von Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, USA). Die Beschleunigungsspannung für

alle REM-Messungen wird konstant bei 10 kV gehalten. Zur weiteren Beurteilung des laserstrukturierten Bereichs werden Makroschliffe mit dem Auflichtmikroskop Axio-Imager m2m der Carl Zeiss AG (Oberkochen, Deutschland) untersucht. Zur Ermittlung der Zugscherfestigkeit wird die Prüfung in Anlehnung an die DIN EN 1465 mit einer Z050 AllroundLine Materialprüfmaschine von ZwickRoell GmbH & Co. KG (Ulm, Deutschland) mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Vor der mechanischen Prüfung werden die Proben auf Grund der Wasseraufnahmefähigkeit des Polyamids 6 zunächst für mindestens 12 h in einem Trockenschrank VD 112 der Firma BINDER GmbH (Tuttlingen, Deutschland) bei 80 °C getrocknet und anschließend nach der DIN EN ISO 1110 bei 70 °C und 62 % relativer Luftfeuchte für 7 Tage in der Klimakammer KBF 720 der BINDER GmbH (Tuttlingen, Deutschland) konditioniert, um einen einheitlichen Feuchtegrad des Kunststofffügeteils für die Prüfung sicherzustellen.

### **3 Ergebnisse und Diskussion**

#### *3.1 Oberflächenvorbehandlung*

*Abbildung 5 a)* zeigt eine REM Aufnahme einer unbehandelten Aluminiumguss-oberfläche bei der, bis auf einige rissartige Formationen resultierend aus sich überlappenden Kristallisationszentren beim Gießprozess, keine ausgeprägten Strukturen zu erkennen sind. Nach Funktionalisierung der Oberfläche mit Polyacrylsäure ist in *Abb 5 b)* zu erkennen, dass keine rissartigen Strukturen mehr vorhanden sind. Die geschlossenen Risse deuten auf eine erfolgreiche Funktionalisierung hin. Die Oberflächenvorbehandlung mittels Laser zeigt *Abb. 5 d)*. Die Oberflächenänderungen zeigen, dass der Wärmeeintrag in die Oberfläche hoch genug ist, um das Aluminium (Schmelzpunkt Aluminium: 660,2 °C [31]) aufzuschmelzen und Strukturen zu formen. Durch den zusätzlichen Verdampfungsprozess und den resultierenden Rückstoßdruck wird das flüssige Aluminium aus dem Schmelzebad ausgestoßen. Trotz einer Linienbreite von 120 µm bei einem Spotdurchmesser von lediglich 100 µm wird die Oberfläche vollständig mit Verästelungen, Schmelzetropfen und Hinterschneidungen bedeckt, welche potentielle Anbindungspunkte für Kunststoffschmelze darstellen können. Wird die gelaserte Oberfläche zusätzlich funktionalisiert, kann in *Abb. 5 c)* kein Unterschied zu einer elementaren Laserstrukturierung erkannt werden. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die Beschichtungsstärke sehr viel geringer ist, als die Höhe der abgebildeten Strukturen.

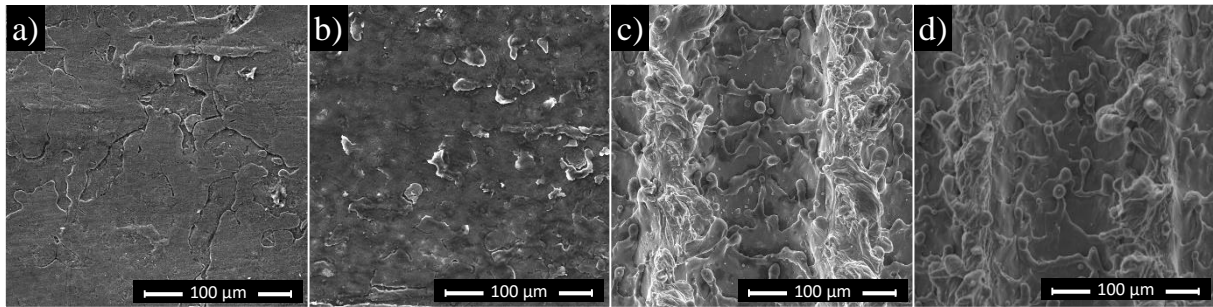


Abb. 5: REM Aufnahmen der Aluminiumgussoberflächen: a) Unbehandelt, b) Chemische Behandlung, c) Laserbehandlung und chemische Behandlung, d) Laserbehandlung

Die unbehandelte Oberfläche in Abb. 6 a) weist keine eindeutig identifizierbaren Rissstrukturen auf. Somit sind die erkennbaren rissartigen Strukturen in Abb. 5 a) von geringer Tiefe. Im Vergleich dazu ist bei der laserstrukturierten Oberfläche in Abb. 6 b) zu erkennen, dass Material umgeschmolzen wurde. Die Strukturen erreichen eine mittlere Tiefe von  $21,5 \pm 1,7 \mu\text{m}$  sowie eine mittlere Höhe von  $30,2 \pm 7,8 \mu\text{m}$ .

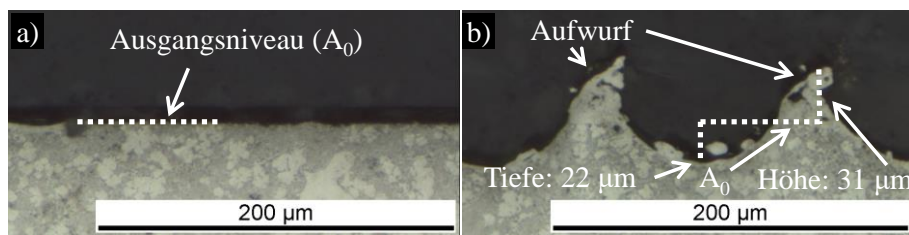


Abb. 6: Schliffbilder der Aluminiumgussoberflächen: a) Unbehandelt, b) Laserbehandlung

### 3.2 Zugscherprüfungen

Die Notwendigkeit einer Vorbehandlung zeigen die Ergebnisse in Abb. 7, da alle unbehandelten Proben vor der Prüfung versagen. Ähnlich wie in [7] beschrieben, könnten Trennmittelrückstände aus dem Druckgussprozess die Haftung verhindern. Im Vergleich dazu können mit einer Funktionalisierung der Oberfläche Proben hergestellt werden. Dies kann auf potenzielle, intermolekulare Wechselwirkungen zwischen PA 6 und Polyacrylsäure zurückzuführen werden [24], da die primäre Wechselwirkung zwischen Polyamidketten auf Wasserstoffbrückenbindungen basiert, was für die Verbindung mit Polyacrylsäure vorteilhaft ist, da diese in der Lage ist, Wasserstoffbrückenbindungen einzugehen. Mögliche weitere Wechselwirkungen sind von untergeordneter Rolle, da Wasserstoffbrückenbindungen bereits die stärksten intermolekularen Kräfte darstellen [31].

Die am ifs hergestellten Proben übertragen mit  $20,41 \pm 6,08$  MPa um 63,4% höhere Festigkeiten als die am IFM hergestellten Proben. Eine mögliche Ursache ist, dass die Proben nach Fertigstellung ans ifs transportiert und somit vor Konditionierungsstart 8 Wochen undefiniert gelagert wurden. Vorherige Alterungseffekte der chemischen Beschichtung können daher nicht ausgeschlossen werden.

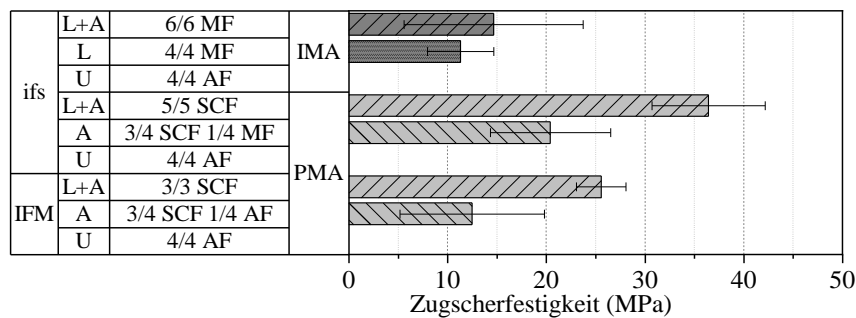


Abb. 7: Ergebnisse der Zugscherprüfungen an Hybridproben nach dem Herstellungsort (Institut für Füge- und Schweißtechnik (ifs) und Institute for Frontier Materials (IFM) mit den Fertigungsverfahren Post-Mold-Assembly (PMA) und In-Mold-Assembly (IMA), mit den Vorbehandlungen U: Unbehandelt, L: Laser, A: Funktionalisierung mit Acrylsäure; Häufigkeit der Bruchbilder: AF: Adhäsionsbruch, SCF: Substratnaher Kohäsionsbruch, MF: Mischbruch; Fehlerbalken zeigen Standardabweichung, bei U: Probenversagen vor Prüfung

Einen weiteren Einfluss hat die temperatur- [8] und drucksensitive [8, 33] Probenfertigung. Der höhere Druck während der Heizphase am IFM könnte sich dabei negativ auf die Verbindungsfestigkeiten auswirken [8, 33], da mehr Matrix aus der Fügezone verdrängt wird, die dann nicht mehr für Bindungen bereitsteht. Darüber hinaus wird am IFM kein kontinuierlicher Anpressdruck während der Probenkühlung aufrechterhalten, so dass diese sich lokal enthaften können. Die höheren Festigkeiten der ifs Proben zeigen jedoch, dass die Lagerung der funktionalisierten Oberflächen anscheinend keinen negativen Einfluss haben und bestätigen die Untersuchungen von [24]. Mit einer Funktionalisierung und Laservorbehandlung werden die Festigkeiten der am ifs gefertigten Proben um 78,5 % auf  $36,43 \pm 5,73$  MPa gesteigert, am IFM um 104,5 % auf  $25,55 \pm 2,5$  MPa. Dies wird dadurch erreicht, dass durch Verästelungen und Schmelzetropfen die Oberfläche für stoffschlüssige Verbindungen vergrößert wird und die Kunststoffschmelze sich in Hinterschneidungen verklammern kann.



Bei den per IMA hergestellten Proben kann mit einer Laservorbehandlung eine Verbindungsfestigkeit in Höhe von  $11,32 \pm 3,36$  MPa erreicht werden. Neben der geometrischen Oberflächenänderung erfolgt vermutlich auch eine chemische Veränderung der Oberfläche. Mit Funktionalisierung wird die Festigkeit um 29,4 % auf  $14,65 \pm 9,08$  MPa gesteigert.

Die Bruchbilder in Abb. 8 zeigen beispielhafte Fehlstellen in der Fügezone. Diese Bereiche adhäsiven Versagens (weiße Sechsecke) können durch eine unvollständige Benetzung in Folge einer unzureichenden oder inhomogenen Erwärmung während des Fügeprozesses entstehen, da die Oberflächentemperatur des Einlegers einen hohen Einfluss auf die Verbindungsausprägung hat [18]. Auch kann eine erneute Kontamination der Oberfläche ursächlich sein. Grenzschichtnahe Poren (weiße Rauten) deuten ebenfalls auf eine suboptimale Vorwärmung oder auf Materialfehler hin. Mit einer geänderten Prozessführung zur Verbesserung des Erwärmungsvorgangs und einer Materialanalyse, z.B. mittels Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie zur Detektion von Kontaminationen, sind die genannten Fehlerquellen in Zukunft weiter zu untersuchen. Die im Vergleich hohen Festigkeit von maximal 28,65 MPa und Substratreste des PA 6 GF30 (weiße Rechtecke) zeigen, dass die Vorbehandlung erfolgreich war. Eine Optimierung des Spritzgießprozesses könnte die Streuung der Verbindungsfestigkeiten reduzieren und die Fehlstellen reduzieren. Zur Aufklärung des Einflusses der genannten Fehler sind jedoch weiterführende Untersuchungen notwendig.

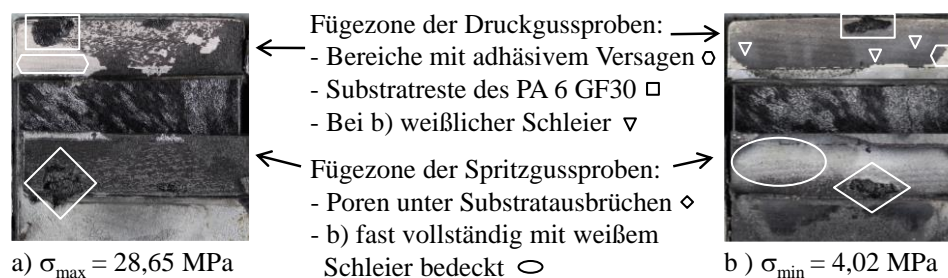


Abb. 8: Bruchbilder IMA Proben: a) Probe mit maximaler Festigkeit, b) Probe mit minimaler Festigkeit, jeweils mit einem Zugscherversuch ermittelt

#### 4 Zusammenfassung

Aluminiumdruckgussproben der Legierung AlSi10MnMg konnten erfolgreich laserstrukturiert und mit Polyacrylsäure beschichtet werden. Mit der Funktionalisierung konnten Festigkeiten bis zu  $20,41 \pm 6,08$  MPa erreicht werden. Die Verbesserung des Anbindungsverhaltens lässt sich vermutlich auf Wasserstoffbrückenbindungen zurückführen [24]. In Kombination mit einer Laserstrukturierung können die Festigkeiten auf

bis zu  $36,43 \pm 5,73$  MPa gesteigert werden. Auch hat eine Lagerung der funktionalisierten Proben keinen negativen Einfluss auf die Verbindungsausprägung. Die kombinierte Vorbehandlung bei Aluminiumdruckguss-Spritzguss Verbindungen erzielen Festigkeiten von bis zu  $14,65 \pm 9,08$  MPa, allerdings zeigten sich Fehlstellen (unbenetzte Bereiche und Poren) in der Fügezone. Die kombinierte Oberflächenvorbehandlung zeigt somit das Potential zusätzlicher Wasserstoffbrückenbindungen bei direkten Metall-Kunststoff-Verbindungen.

## Literatur

- [1] Ridders, H.; Schnieders, J.: Hybridspritzgießen – Möglichkeiten und Grenze, Tagungsband Spritzgießen 2007, Baden-Baden, Deutschland, 14. – 15. Februar 2007, Düsseldorf, VDI-Verlag, 2007.
- [2] Endemann, U.; Glaser, S.; Völker, M.: Verbindungstechnik für Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen: Kunststoff und Metall im festen Verbund, Kunststoffe, Auflage 92, Ausgabe 11, S. 110–113, 2002.
- [3] Goldach, H., Hoffner, J.: Hybridbauteil in der Serienfertigung, Anwendungstechnische Information, Bayer Leverkusen AG, S. 1–5, 2000.
- [4] Op de Laak, M.; Pötsch, G.; Schwitzer, K.: Kunststoff–Metall–Hybrid, Kunststoffe, Auflage 9, Ausgabe 9, S. 112–118, 2001.
- [5] Paul, H.; Luke, M.; Henning, F.: Kunststoff-Metall-Hybridverbunde - Experimentelle Untersuchungen zum Verformungs- und Versagensverhalten, Kunststofftechnik - Journal of plastics technology, vol. 10, issue 4, S. 117–141, 2014.
- [6] Grujicic, M.; Sellappan, V.; Omar, M.A. et al.: An overview of the polymer-to-metal direct adhesion hybrid technologies for load-bearing automotive components, Journal of Materials Processing Technology, vol. 197, S. 363–373, 2008.
- [7] Pries, H.; Shi, J.; Stammen, E.; Dilger, K.: Prozesssicheres Kleben von strukturellen Aluminiumdruckguss-Komponenten, Giesserei, Band 103, Ausgabe 03/2016, 2016.
- [8] Lippky, K.; Mund, M.; Blass, D.; Dilger, K.: Investigation of hybrid fusion bonds under varying manufacturing and operating procedures, Composite Structures, vol. 202, S. 275–282, 2018.

- [9] Eckstädt, J.; Rauschenberger, J.: Laser joining of textured metal and plastic component, Tagungsband Laser in Manufacturing Konferenz 2017, (Hrsg.: Overmeyer, L.; Reisgen, U.; Ostendorf, A.; Schmidt, M.) München, 26.–29. Juni 2017, München, 2017.
- [10] Roesner, A.; Scheik, S.; Olowinsky, A. et al.: Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids, *Physics Procedia*, vol 12, S. 370.377, 2011.
- [11] Rodríguez–Vidal, E.; Sanz, C.; Lambarri, J.; Renard, J.; Gantchenko, V.: Laser Joining of Different Polymer-metal Configurations: Analysis of Mechanical Performance and Failure Mechanisms, *Physics Procedia* 83, S. 1110–1117, 2016.
- [12] Koshukow, W.; Krah, M.; Gude, M.; Götz, P.; Kirchhoff, Marc: Influence of Laser Surface Treatment for Process-Integrated Joining of Textile Reinforced Thermoplastic Composites to Metal Sheets, *KEM* 742, S. 366–373, 2017.
- [13] Yeh, R.; Hsu, R.: Development of ultrasonic direct joining of thermoplastic to laser structured metal, *International Journal of Adhesion and Adhesives* 65, S. 28–32, 2016.
- [14] Schrick, K.; Stambke, M.; Bergmann, J. P.; and Bräutigam, K.: Laser-Based Joining of Thermoplastics to Metals: Influence of Varied Ambient Conditions on Joint Performance and Microstructure, *International Journal of Polymer Science*, vol. 2016, S. 1–9, 2016.
- [15] Heckert, A.; Singer, C.; Zaeh, M. F.; Daub, R.; Zeilinger, T.: Gas-tight thermally joined metal-thermoplastic connections by pulsed laser surface pre-treatment, Tagungsband 9th International Conference on Photonic Technologies – LANE 2016, (Eds. M. Schmidt, F. Vollertsen, C. B. Arnold), Fürth, Germany, September 19–22, 2016, vol. 83, S. 1083–1093, 2016.
- [16] Schrick, K.; Diller, S.; Bergmann, J. P.: Bubble formation in thermal joining of plastics with metals, *Procedia CIRP* 74, S. 518–523, 2018.
- [17] Lugauer, F. P.; Kandler, A.; Meyer, S. P.; Wunderling, C.; Zaeh, M. F.: Induction-based joining of titanium with thermoplastics. *Prod. Eng. Res. Devel.* 13 (3–4), S. 409–424, 2019.
- [18] Spancken, D.; van der Straeten, K.; Beck, J.; Stötzner, N.: Laserstrukturierung von Metalloberflächen für Hybridverbindungen, *Lightweight Design*, vol. 11, Ausgabe 4, S. 16–23, 2018.

- [19] Drossel, W. G.; Lies, C., Albert, A.; Haase, R.; Müller, R. Scholz, P.: Process combinations for the manufacturing of metal–plastic hybrid parts, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 118, 18th Chemnitz Seminar on Materials Engineering – 18. Werkstofftechnisches Kolloquium 10.–11. März 2016, Chemnitz, 2016.
- [20] Amend, P.; Wolf, M.; Mrotzek, T.; Laumer, T.; Roth, S.; Gude, M.; Schmidt, M.: Experimental investigations on laser-based hot-melt bonding and injection molding for laser–structured metal plastic hybrids, Proceedings of Laser in Manufacturing Conference 2017(Hrsg.: Overmeyer, L.; Reisgen, U.; Ostendorf, A.; Schmidt, M.) München, 26.–29. Juni 2017, München, 2017.
- [21] Gebauer, J.; Fischer, M.; Lasagni, A. F.; Kühnert, I.; Klotzbach, A.: Laser structured surfaces for metal-plastic hybrid joined by injection molding, Journal of Laser Applications 30(3), 032021, 2018.
- [22] Ségaud, J. M.: Ganzheitliche Betrachtung von effizientem Leichtbau bei struktureller Gussanwendung in der Prozesskette Karosserie, Giesserei Rundschau, Jg. 2013, Heft 9/10, Seite 278, 2013.
- [23] Fent, A.; Lang, H.; Tremmel, M.: Werkstoffe für Druckgusswerkzeuge, 7. VDI–Tagung Gießtechnik im Motorenbau 07.02.13, Magdeburg, 2013.
- [24] Stojcevski, F.; Siddique, O.; Meric, G.; Randall, J.D.; Emonson, N. S.; Henderson, L.C.: Using in situ polymerisation to enhance adhesion of dissimilar materials, International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 104, 2021.
- [25] RHEINFELDEN ALLOYS GmbH & Co. KG, Silafont®–36 [AlSi10MnMg] – mechanische Eigenschaften, <https://rheinfelden-alloys.eu/legierungen/silafont/>, abgerufen am 15.12.2020, 20:57 Uhr.
- [26] Bond–Laminates GmbH: Materialdatenblatt Tepex® dynalite 102-RG600(x)/47% Roving Glass – PA 6 Consolidated Composite Laminate, Brilon.
- [27] LANXESS Deutschland GmbH: Materialdatenblatt Durethan BKV30H2.0EF 901510, Köln.
- [28] SPI Lasers UK Ltd., G4 Pulsed Fibre Laser Specification for 70W HS-H, 2013.
- [29] Norm DIN EN 1465:2009-07: Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen, Ausgabe: Deutsche Fassung EN 1465:2009, Berlin: Beuth Verlag.

- [30] Steinberg, J.; Lippky, K.; Dilger, K.; Hartwig, S.: Laser based pretreatment of aluminum castings for hybrid injection molding, Tagungsband der 22nd International Conference on Composite Materials (ICCM22), 11 – 16 August 2019 Melbourne, 2019.
- [31] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin, Heidelberg, Springer Verlag, 2014.
- [32] Binnewies, M.; Finze, M.; Jäckel, M.; Schmidt, P.; Willner, H.; Rayner-Canham, G.: Allgemeine und Anorganische Chemie, Berlin, Springer-Verlag, 2016.
- [33] Mitschang, P.; Velthuis, R.; Emrich, S.; Kopnarski, M.: Induction Heated Joining of Aluminum and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66, Journal of Thermoplastic Composite Materials 22 (6), S. 767–801, 2009.

### **Autorenanschriften**

Julian Steinberg, M.Sc.

Prof. Dr. rer. nat. Sven Hartwig

Technische Universität Braunschweig

Institut für Füge- und Schweißtechnik

Langer Kamp 8

38106 Braunschweig

Telefon: 0531 – 39195501

Telefax: 0531–39195599

E-Mail: [j.steinberg@tu-braunschweig.de](mailto:j.steinberg@tu-braunschweig.de)

Dr. Filip Stojcevski

James D. Randall

Professor Luke C. Henderson

The Institute for Frontier Materials (IFM)

Deakin University

Geelong Waurn Ponds Campus

Locked Bag 20000

Geelong, Victoria 3220

Telefon: +61 3 5247 9255

E-Mail: [f.stojcevski@deakin.edu.au](mailto:f.stojcevski@deakin.edu.au)